

凍結・凍上に対する岩盤路床の合理的評価手法に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）
研究期間：平 18～平 21
担当チーム：防災地質チーム
研究担当者：伊東 佳彦、阿南 修司、
日下部 祐基、高橋 幸継

【要旨】

積雪寒冷地における岩盤の道路路床としての長期安定性を簡便に評価する方法を構築するため、北海道各地の岩石を検討した。試料は、主として実際の道路建設現場から採取し、岩種は堆積岩類、火山岩類、火山碎屑岩類である。各試料について凍結融解試験を繰り返した後、飽和密度、吸水率、P波速度、一軸圧縮強さを計測した。室内試験での凍結融解繰り返しの最大サイクル数は300サイクルである。岩盤路床の長期安定性を評価する上での凍結融解後に岩石が崩壊するサイクルの境界値は、数年間凍結融解作用を被った実路床での計測結果をもとに150サイクルとした。各試料の崩壊サイクルと飽和密度等工学特性とを対比し、新しい評価基準として飽和密度を 2.2t/m^3 以上、吸水率を6.0%以下、P波速度を 3.0km/s 以上、一軸圧縮強さを 15MN/m^2 以上として評価法を提案した。キーワード：岩盤劣化、凍上、凍結融解

1. はじめに

北海道のような寒冷地の道路建設において岩盤を路床として利用しようとする場合、対象岩盤の凍上および支持力に対する長期安定性を評価・判定する必要がある¹⁾。しかし、従来、基準化された精度の高い判定方法がなかったため、個々の現場で凍上試験を行って評価するか、安全側の施工となる路盤材での置換を行っていた。この場合、特に後者では掘削する必要がない岩盤を掘削することとなり、道路建設費増嵩の一因となっていた。

このような課題の解決のため、これまでに北海道の国道建設において岩盤路床としての評価が必要な岩石を中心に新たに考案した凍結融解凍上試験を実施し、岩盤の凍上・支持力の簡易判定法確立に向けた検討^{2,3)}を行ってきた。その結果、2007年に新しい簡易判定法（以下、既存法）を構築・提案し、道路設計要領の参考資料に採用された⁴⁾。しかし、既存法は北海道東部の堆積岩類での検討をもとに構築されたものであり、他の岩種における汎用性を検証し、判定値の精度向上を図る必要があった。本研究では、検討岩種を増やすとともに原位置での長期計測の結果を加え、既存法を見直し、新しい簡易判定法（以下、新判定法）を構築したのでその結果を報告する。

2. 研究方法

2. 1 既存法の妥当性検証と精度向上の検討

既存評価法は、凍上性の判定を各物理特性値から、支持力低下を一軸圧縮強さから判定する。凍上性の判定に用いた各物理特性値は、既存文献⁵⁾で示された判定値に本研究で対象とした岩盤の値を比較検討して決定したものである。支持力低下を判定する一軸圧縮強さの値は、凍結融解を繰り返した後の岩盤の

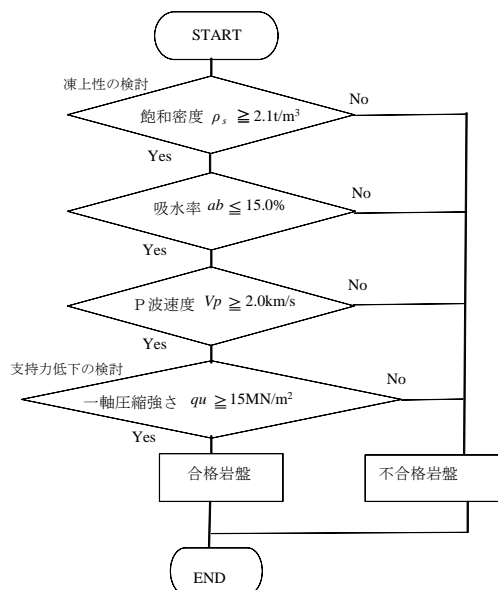


図-1 岩盤路床の既存簡易判定法フロー図

強度低下を考慮して決定したものである。図-1に既存法のフロー図を示す。

本研究では、既存法の妥当性検証として現地モニタリングを実施した。現地モニタリングの場所は、釧路市東部の丘陵地における道路建設中の切土掘削面⁶⁾で、地層は古第三紀春採層の礫岩およびシルト岩の2岩種を対象にしている。室内試験による岩盤路床合否の判定結果は、礫岩が合格岩盤でシルト岩が要検討岩盤とされている。

合格岩盤の舗装構成は、不陸整正材料として粒状材料(碎石)を平均厚さ15cm程度敷均して締固め、その上面を下層路盤面として上層路盤のアス処理、基層表層のアスファルト舗装とした。要検討岩盤では、合格岩盤と同様の舗装構成のほかに、不陸整正材料として粒状材料より上質な貧配合コンクリートを用いたものを追加して、2種類の舗装構成で現地モニタリングを行っている。

現地モニタリングの内容は、現地地中温度などの測定の外に春と秋の年二回ボーリングコアの採取や、圧縮試験、凍上試験、超音波伝播試験、比重・吸水試験などである。現地モニタリングで用いている観測機器と配置等を図-2に示す。

2.2 他の地質での汎用性の検証

既存法は、前述の現地モニタリング現場の岩種である堆積岩の試験結果から考案されたものである。この判定法について、他の地質での汎用性の検証を火砕岩および火山岩の現場で実施した。場所は、北海道赤井川村の国道に位置する岩盤路床である。モニタリングは、長期的な路面変状の有無を肉眼観察する他に、地中温度の変化を計測している。

2.3 岩盤路床の簡便かつ経済的な評価手法の検討

ここでは、各種岩種に対応した簡便かつ経済的な新判定法の検討として、室内岩石試験を行って分析した。試料の岩種は、堆積岩類13(礫岩2、砂岩8、泥岩3)、火山岩類4(安山岩4)、火山砕屑岩類4(火山礫凝灰岩1、凝灰質砂岩1、流紋岩質凝灰岩1、水冷破碎岩1)の計21試料である。実施した岩石試験は、既存法の判定に用いている飽和密度、吸水率、P波速度、および一軸圧縮強さを求めるための比重吸水試験、超音波伝播試験、および一軸圧縮試験である。

3. 研究結果

3.1 既存法の妥当性検証と精度向上の検討結果

ここでは、室内試験で推定された対象岩石の凍結

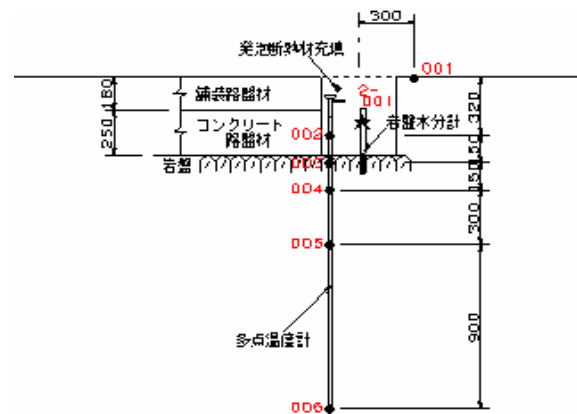


図-2 現地モニタリング測定器配置図

融解繰返しによる強度低下や凍上性の進展が、テストフィールドから採取したコア試料の状態とどの程度合致しているかを検討した。

図-3, 4に室内試験および現地モニタリングより求めた、合格岩盤および要検討岩盤の凍結融解サイクル数と一軸圧縮強さとの関係を示す。図-3の合格岩盤は、過去の室内試験で凍結融解作用による強度低下がみられなかったものである。現地モニタリングの試験結果では、0サイクルの初期強度が室内と現地の試験供試体で差異がみられるが、現地の試験結果でも大きな強度低下が認められない。

図-4の要検討岩盤は、室内試験結果で凍結融解の初期サイクルにおいて強度低下する傾向がみられたものである。現地モニタリングの試験結果では、不陸整正材料に貧配合コンクリートおよび粒状材料を用いたフィールドとも強度低下傾向が認められない。

図-5, 6に室内試験および現地モニタリングより求めた、合格岩盤および要検討岩盤の凍結融解サイクル数と凍上試験による凍上率(室内試験:凍結融解凍上試験の結果)との関係を示す。凍上率による合否判定は、既往文献⁷⁾にある凍上率20%以下と凍結様式:コンクリート状凍結を合格基準としている。そのため、各図では凍上率の最大目盛りを20%にして示した。図よりわかるように、合格岩盤および要検討岩盤とも凍結融解サイクル数が重なる範囲の室内と現地の凍上率は、0~2%程度を示し相関が認められる。

これらのことから、現時点では室内試験で得られた凍結融解の繰返しと岩石強度の関係は、合格岩盤については現地試験結果と同様の傾向にあり、要検討岩盤については現地試験結果に比べて安全側の結

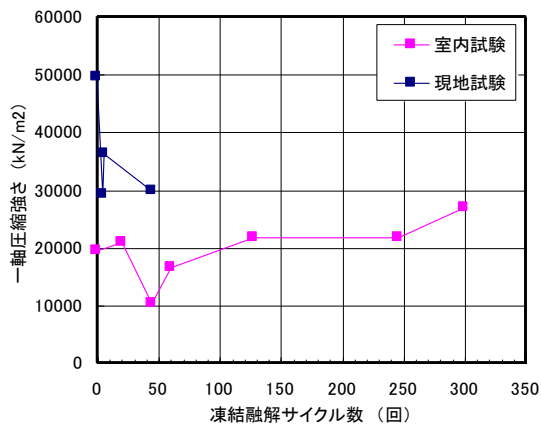


図-3 合格岩盤の凍結融解サイクル数と一軸圧縮強さ

(室内試験：過去の室内試験結果、現地試験：現地モニタリング試料の試験結果)

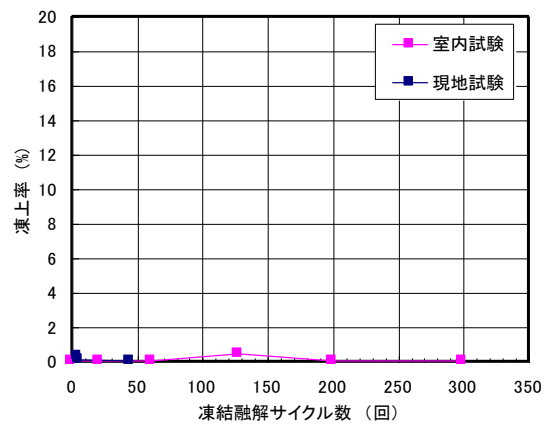


図-5 合格岩盤の凍結融解サイクル数と凍上率

(室内試験：過去の室内試験結果、現地試験：現地モニタリング試料の試験結果)

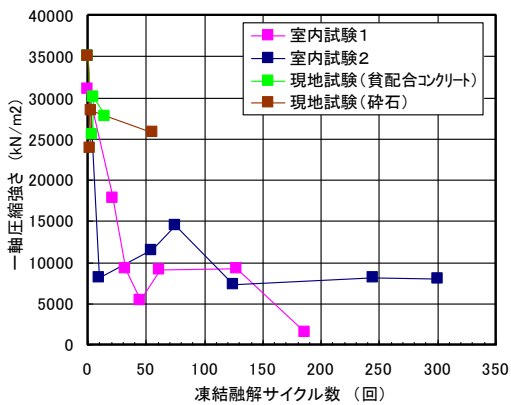


図-4 要検討岩盤の凍結融解サイクル数と一軸圧縮強さ

(室内試験：過去の室内試験結果、現地試験：現地モニタリング試料の試験結果)

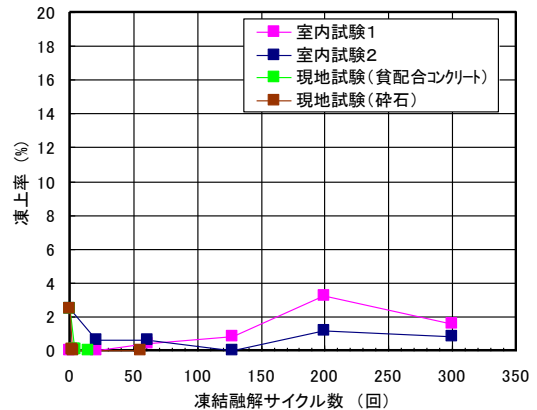


図-6 要検討岩盤の凍結融解サイクル数と凍上率

(室内試験：過去の室内試験結果、現地試験：現地モニタリング試料の試験結果)

果になっている。凍結融解の繰返しと凍上性の変化傾向では、合格・要検討岩盤とも室内試験結果が現地試験結果と同様の傾向になっていることが認められる。

3. 2 他の地質での汎用性の検証結果

現地モニタリングの結果では、肉眼による路面変状の有無については特に変状は確認されていない。地中温度計測による凍結融解サイクルと強度劣化の関係については、道路供用開始が遅れたために分析されていない。今後継続して計測する必要がある。

3. 3 岩盤路床の簡便かつ経済的な評価手法の提案

3. 3. 1 試験結果

試験結果を表-1に示す。表に示した凍結融解後の

最大凍上率とは、凍結融解凍上試験により数種の任意サイクル凍結融解後に行った凍上試験で得られた凍上率の最大値を示したものである。また、崩壊サイクルとは、同様に数種の任意サイクル凍結融解後の一軸圧縮強さが測定できた限界サイクルを示したものである。厳密にはこの崩壊サイクル後に供試体が崩れたことになるが、正確な崩壊サイクルが求められなかったため、一軸圧縮試験の最終実施サイクルを示した。

長期的な凍上性と支持力低下を考慮した岩盤路床の長期安定性の合否基準として、最大凍上率と崩壊サイクルを採用した。凍上性の判定基準は、3. 1項でも用いた道路土工-排水工指針に準拠して凍上率

表-1 岩石試験結果

No.	試料名	岩種	採取地	吸水率 (%)	飽和密度 (t/m ³)	P波速度 (km/s)	一軸圧縮強さ (MN/m ²)	凍結融解後最大凍上率 (%)	崩壊サイクル(c)	備考
1	春採層 礫岩	堆積岩	釧路町	3.14	2.55	4.19	19.4	0.4	300	既存法構築対象データ
2	春採層 砂岩 1	"	"	5.62	2.45	3.43	31.1	3.2	186	
3	春採層 砂岩 2	"	"	5.08	2.40	3.60	35.1	1.2	300	
4	雄別層 砂岩	"	"	10.42	2.32	1.26	6.7	6.2	106	
5	雄別層 泥岩 1	"	"	6.46	2.41	2.14	7.7	38.9	11	
6	雄別層 泥岩 2	"	"	6.46	2.41	2.38	3.3	4.9	7	
7	天寧層 礫岩	堆積岩	釧路町	1.60	2.62	4.53	98.0	0.0	300	新判定法構築追加データ
8	天寧層 炭質泥岩	"	"	7.67	2.21	2.42	6.7	1.2	32	
9	春日層 火山礫凝灰岩	火砕岩	赤井川村	14.31	2.10	2.43	9.3	59.4	54	
10	春日層 風化安山岩	火山岩	"	4.77	2.47	3.86	32.8	1.2	200	
11	春日層 安山岩	"	"	2.25	2.60	4.71	60.0	0.0	300	
12	粗粒砂岩	堆積岩	乙部町	24.63	1.99	2.66	8.1	23.1	13	
13	細粒砂岩	"	"	33.00	1.86	2.31	9.4	68.2	6	
14	流紋岩質凝灰岩	火砕岩	鹿部町	14.43	2.08	2.70	12.9	35.5	37	
15	凝灰質砂岩	"	"	27.09	1.95	1.22	0.8	2.0	6	
16	蝦夷層群 砂岩	堆積岩	芦別市	2.11	2.58	4.26	58.5	5.3	300	
17	川端層 砂岩 1	"	厚真町	6.22	2.41	2.80	11.0	1.6	40	
18	川端層 砂岩 2	"	"	7.07	2.41	2.71	26.1	9.1	40	
19	美笛層 風化安山岩 1	火山岩	岩内町	5.17	2.48	4.52	20.8	5.0	300	
20	美笛層 風化安山岩 2	"	"	13.08	2.22	3.01	5.4	14.3	20	
21	水冷破砕岩	火砕岩	喜茂別町	3.49	2.25	4.32	61.8	0.8	300	

* 太文字の試料は、今回の判定法見直しで用いた追加データ、それ以外は既存法の検討で用いたデータである。

20%以下を採用した。また、長期的な安定性の評価基準として、崩壊サイクルが 150c 以上を合格とした。そして、両方の条件を満足するものを岩盤路床として合格であると評価した。図-7 にこれらの関係を示す。崩壊サイクルの基準を 150c 以上とした根拠は、図にある 200c 前後を示す試料の 1 つ (表-1、試料 No.2、3、1 項の要検討岩盤) について、現地で試験舗装を行ってモニタリングを実施した結果、室内試験では凍結融解初期に急激な強度低下がみられたものが、平成 14~19 年の約 6 年間の計測で強度低下がみられず、路面変状も発生しなかったことから合格と判定されたこと⁸⁾を考慮したものである。

同図から分かるように、最大凍上率が 20% 以下でも崩壊サイクルが 150c 未満で崩壊する試料があり、最大凍上率だけから路床としての適格性は評価できないが、崩壊サイクルが 150c 以上を示す試料ではすべて最大凍上率が 20% 以下を満足することが分かる。

3. 3. 2 判定法の見直し

前項で示したように、合否判定の指標に崩壊サイクル 150c 以上を用いると、もう 1 つの指標である最大凍上率 20% 以下を満足することが判明した。そこで、崩壊サイクルと各物性値との関係を示して、判定値の見直しを検討する。

図-8~11 に崩壊サイクルと飽和密度、吸水率、P 波速度、および一軸圧縮強さの関係を示す。各図の横軸に平行に赤破線で示した値が既存法における判

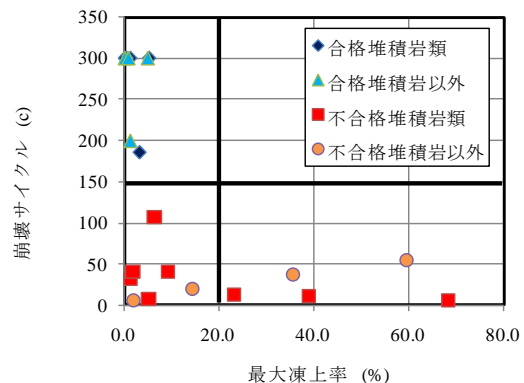


図-7 最大凍上率と崩壊サイクルの関係

定値、黒実線が新判定法による判定値である。

既存法については、例えば、吸水率や P 波速度では、不合格試料をかなり見落としている結果となっており、判定値を見直す必要があることが判明した。見直しの方法としては、各物性値の合格となる岩盤と不合格となる岩盤の限界値を比較して、経済性を重視して判定値を決定した。これは、前項でも述べたように、室内試験で合否の検討を要した岩盤において現地モニタリングを実施した結果、合格と判定されたことから、室内試験が現地の状況より過酷な条件になっていると予想されたためである。

P 波速度、吸水率については、それぞれ 3.0km/s、6.0% を境に試料が合格と不合格に明瞭に区分され

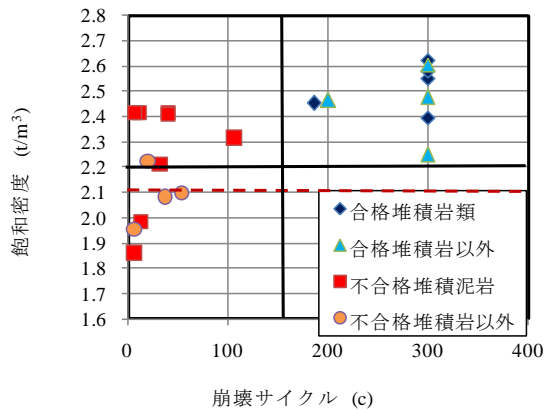


図-8 崩壊サイクルと飽和密度の関係

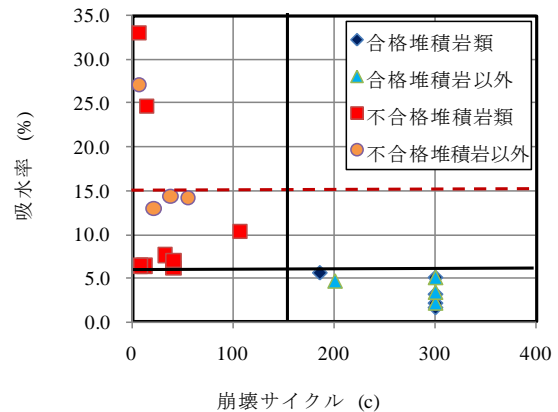


図-9 崩壊サイクルと吸水率の関係

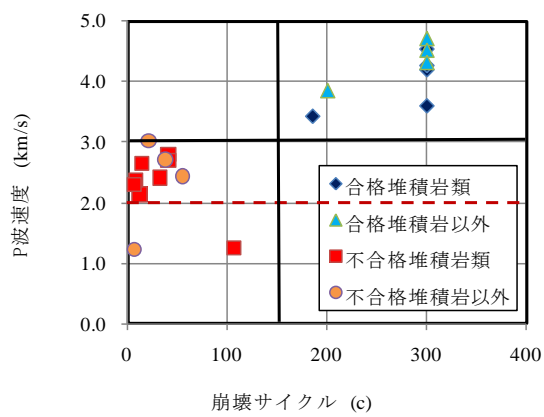


図-10 崩壊サイクルとP波速度の関係

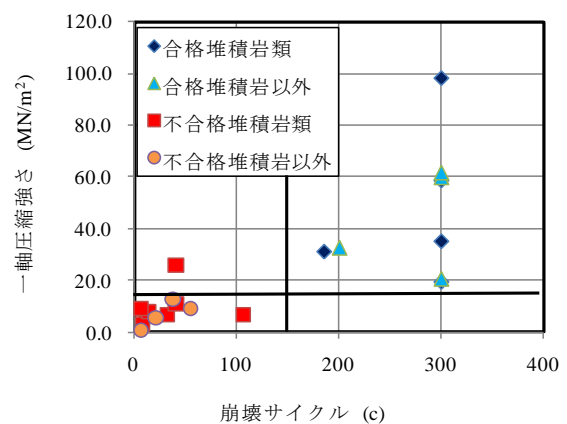


図-11 崩壊サイクルと一軸圧縮強さの関係

表-2 各物性の合否限界値

物性値	合格岩盤 限界値	不合格岩 盤限界値	新しい 判定値	既存判 定値	参考値 (星野)	参考値 (磯田ら)	参考値 (北川ら)	参考値 (小野ら)
飽和密度 (t/m ³)	2.25	2.41	2.20	2.10	-	2.10	2.00	1.90
吸水率 (%)	5.62	6.22	6.00	15.00	20.00	15.00	25.00	-
P波速度 (km/s)	3.40	3.00	3.00	2.00	-	2.00	-	2.70
一軸圧縮強さ (MN/m ²)	19.40	26.10	15.00	15.00	-	50~100	5.00	5.00
乾燥密度 (t/m ³)	-	-	-	-	2.0	-	1.5	-
シルト以下含有量 (%)	-	-	-	-	-	-	20.0	-
有効間隙率 (%)	-	-	-	-	-	-	-	40.0

る。一方、飽和密度と一軸圧縮強さについては、合格と不合格を単純には区分できない。そのため、これらの指標については岩盤を極力活用するという観点から、合格岩盤の最低値（飽和密度では2.2t/m³、一軸圧縮強さでは15MN/m²）を判定値として採用した。

表-2に各物性値の合否岩盤の限界値と、それらの比較から決定した判定値を示す。あわせて同表には、既往の研究成果⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾を参考値として示す。

なお、各図では礫岩、砂岩、泥岩の堆積岩類とそれ以外を分けて示したが、顕著な特徴は見られなかった。新しい簡易判定フロー図を図-12に示す。

4. まとめ

本研究では、凍結・凍上を考慮した岩盤路床の評価法について検討を行った。その結果、以下のことがわかった。

- 1) 既存法で対象とした堆積岩での現地モニタリングの結果、現時点では室内試験で得られた凍結融解の繰返しと岩石強度の関係は、合格岩盤で現地試験結果と同様の傾向にあり、要検討岩盤で現地試験結果に比べて安全側の結果になっている。
- 2) 既存法で対象外の火山岩と火砕岩での現地モニタ

リングの結果では、肉眼による路面変状の有無については特に変状は確認されていない。

3) 多種岩石の室内試験を分析した結果、判定法に用いる指標およびその判定値として、下記の値が得られ、新判定法フローを提案した。

- ① 飽和密度： $\rho_s \geq 2.2 \text{ t/m}^3$
- ② 吸水率： $ab \leq 6.0\%$
- ③ P波速度： $V_p \geq 3.0 \text{ km/s}$
- ④ 一軸圧縮強さ： $qu \geq 15 \text{ MN/m}^2$

今後は、現地モニタリングを継続して行っていく必要がある。

参考文献

- 1) 国土交通省 北海道開発局：道路設計要領，pp1-5-62～63，2005.4
- 2) 岡崎健治，伊東佳彦，日下部祐基，高橋克也：凍上性岩盤の判定法に関する研究，土木学会北海道支部論文報告集第59号，pp538～541，2003.1
- 3) 田本修一，伊東佳彦，日下部祐基，岡崎健治，蛭沢敦：岩盤路床の凍上性判定法の検討，日本応用地質学会北海道支部研究発表会，pp9～12，2003.6
- 4) 国土交通省 北海道開発局：道路設計要領 第1集 道路，p参29，2008.4
- 5) 磯田卓也，鈴木哲也，疋田貞良：路床の凍上性と上載荷重の影響，開発土木研究所月報，No. 515，pp2～9，1996.4
- 6) 緒方聡，高橋克也，日下部祐基：岩盤路床の検討について—一般国道44号釧路町別保改良工事—，第46回北海道開発局技術研究発表会発表概要集（道路・舗装部門），pp119～126，2003.2
- 7) 日本道路協会：道路土工—排水工指針，pp238～243，1995.2
- 8) 坂本多朗，伊東佳彦，日下部祐基：岩盤路床の凍上性判定法に関する研究について，第51回北海道開発局技術研究発表会，発表概要集道路，コ-10，2008.2
- 9) 星野憲：岩石の凍上について，北海道開発局土木試験所報告，No. 60，pp45～50，1973.6
- 10) 北川修三，川上義輝：凍上試験による地山の凍上性の判定，応用地質，27巻2号，pp11～20，1986.6
- 11) 小野丘，阿部裕介，小笠原将人：疑似岩石試料の凍上性と物理特性，地盤工学会北海道支部，技術報告集第45号，pp71～74，2005.2

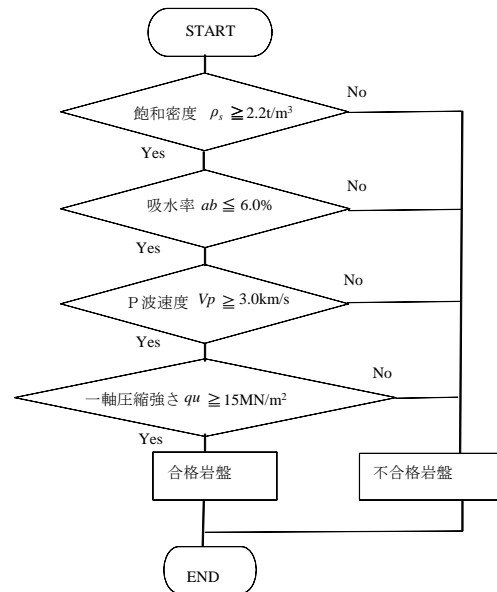


図-12 新しい簡易判定法フロー図